

滇池百年尺度湖泊面积与岸线时空演变特征分析*1

那嘉明¹, 方伟¹, 袁晨阳^{2,3,4}, 王丽霞⁵, 郭金凯^{1,2}, 马小龙¹, 薛滨^{2,3}, 宋春桥^{2,3}, 刘凯^{2,3,**}

(1: 南京林业大学土木工程学院, 南京 210037)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与流域水安全全国重点实验室, 南京 211135)

(3: 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

(4: 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044)

(5: 昆明市滇池高原湖泊研究院, 昆明 650228)

摘要: 滇池作为云南地区最大的淡水湖, 其面积、形态及周边土地利用格局的变化对区域生态安全至关重要。为此, 本研究通过融合历史地形图、航测资料、锁眼侦察卫星影像、Landsat 卫星影像构建了百年滇池面积与形态变化数据集, 并分析了滇池水域范围的时空演变特征。首先, 针对 1985 年前无遥感影像时期数据, 提出了基于历史影像与地形图的半自动水域重建方法; 其次, 对 1985 年—2023 年时期, 基于 Landsat 影像水体指数实现水域范围的自动化提取; 然后, 基于百年时序岸线提取结果, 分析了滇池水域范围及岸线形态时空演变特征; 最后, 基于土地利用类型及气候变化对滇池岸线变化的驱动机制进行了研究。结果表明: (1) 滇池水体面积总体受政策影响呈波动式变化, 水体面积在 1920 年—2012 年期间总体呈下降趋势, 2012 年—2023 年面积呈现回升趋势; (2) 百年间滇池面积减少 8.55%, 周长增加 10.44%, 近圆度减少 26.31%, 岸线发育系数增长 15.58%; (3) 滇池沿岸受人类活动主导驱动, 1985 年—2020 年间, 人工岸线增长 16 倍, 耕地岸线减少 44.53%, 部分极端干旱使得短期湖泊大量萎缩。

关键词: 滇池; 百年尺度; 遥感影像; 水体范围提取; 岸线变化

Spatiotemporal Evolution Characteristic of Area and Morphology of Lake Dianchi over a Century

Na Jiaming¹, Fang Wei¹, Yuan Chenyang^{2,3,4}, Wang Lixia⁵, Guo Jinkai^{1,2}, Ma Xiaolong¹, Xue Bin^{2,3}, Song Chunqiao^{2,3} & Liu Kai^{2,3,**}

(1: College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing (UCASNJ), Nanjing 211135, P.R.China)

(4: School of Geography, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P.R.China)

(5: Kunming Dianchi and Plateau Lakes Institute, Kunming 650228, P.R.China)

Abstract: As the largest freshwater lake in Yunnan, China, Lake Dianchi plays a critical role in regional ecological security, with its surface area, morphology, and adjacent land-use patterns having undergone substantial transformations over the past century. This study integrates multi-source data—including historical topographic maps, aerial photographs, Keyhole satellite imagery, and Landsat series imagery (1920s–2023)—to reconstruct a centennial-scale dataset of the lake's areal and morphological changes. The spatiotemporal evolution of the water extent is analyzed using a dual-method framework: semi-automatic reconstruction for the pre-1985 period based on historical maps and aerial imagery, and automated extraction for 1985–2023 using Landsat-derived water indices. Key findings include: (1) Policy-driven fluctuations in water area, with an overall decline from the 1920s to 2012, followed by a recovery after 2012 due to ecological restoration initiatives; (2) Marked morphological changes, with

*2025-05-20 收稿; 2025-09-21 收修改稿.

云南省省级政府采购重大项目 (KMZC2024-G3-00426) 资助。

**通信作者; Email: kliu@niglas.ac.cn

an 8.55% reduction in surface area accompanied by a 10.44% increase in perimeter, a 26.31% decrease in circularity index, and a 15.58% rise in shoreline development index; (3) Anthropogenic dominance in shoreline transformation, indicated by a shift from natural-agricultural to artificial types, including a 16-fold expansion of artificial shoreline and a 44.53% decline in agricultural shoreline between 1985 and 2020, alongside episodic shrinkage driven by extreme drought events.

Keywords: Lake Dianchi; Centennial scale; Remote sensing imagery; Water boundary extraction; Shoreline change

滇池作为云南省最大的淡水湖泊,不仅是昆明市及周边地区的重要生态屏障,也是区域可持续发展的重要支撑。作为区域生态系统的重要组成,滇池具有多种生态服务功能^[1-2]。在水资源供应方面,滇池曾是昆明市的主要饮用水源之一,尽管近年来污染问题影响了其直接供水功能,但其在调节区域水文、补充地下水 and 农业灌溉中的作用仍不可替代。在维持生态系统多样性方面,滇池作为众多候鸟的迁徙途经之地,流域内拥有多种水生生物和动植物,其生态系统对维持当地生物多样性起到重要作用^[3-4]。在文化和旅游价值方面,滇池凭借其秀美的自然风光和周边独特的民族风情,成为昆明市重要旅游景点。

滇池以其广阔水域支撑着重要的生态服务功能,但其面积变化已深刻影响水资源调控与生态安全^[5]。地质资料表明,战国—西汉时滇池水位较当下高出约 10 m,对应湖泊面积约 600 km²,明清时期则萎缩至 350 km² 以下。近百年来,气候波动叠加农业围垦与城市化扩张等人类干预,推动了“环湖造城、城进湖退”的不合理利用模式,致使湖泊自净能力下降、水体污染加剧。自 2008 年起,昆明市实施“四退三还一护”生态工程,虽在一定程度上遏制了萎缩趋势,但驱动机制尚未完全厘清^[6]。

目前,多源遥感技术为湖泊长时序动态监测提供了数据基础^[7]。余姝辰在此问题上通过挖掘明清至上世纪 60 年代历史数据结合近代卫星遥感数据,采用遥感解译分析完成了洞庭湖区格局演化研究^[8];谷娟等人基于 MODIS 数据的地物光谱特征,分析了 2000 年—2015 年退水期鄱阳湖水体淹没频率的空间规律,并探讨了其对湿地植被的空间响应^[9]。目前,已有研究利用多源卫星遥感资料,开展了不同时期的滇池水域变化监测。肖茜等人以云贵高原 10 大湖泊近 30 年来的 TM、ETM+和 OLI 遥感影像数据源对水体面积变化时空演变进行了分析,但受制于对地观测数据的时空覆盖度,对于 1980 年之前,仍缺乏定量数据分析^[10]。此外,现有研究较少开展面向滇池面积及其岸线变化的协同分析,鲜有将水域范围演变与岸线周边土地利用及气候因子耦合分析的综合视角,这使得无法全面理解滇池岸线的演变规律。

为此,针对上述研究存在的科学问题,本研究聚焦于滇池百年尺度水域与岸线演变的时空特征及气候变化与人类活动在其岸线演变中的贡献等进行了进一步挖掘。研究采用历史影像及地形图解译并结合遥感影像水体自动提取的方法,对滇池自 1920 年以来的岸线形态、面积及土地利用类型进行百年尺度系统性分析。对于 1980 年前的历史影像数据,通过地理配准及预处理后,基于灰度差异采用人工目视解译方式勾绘滇池水域范围,实现半自动化提取。对于遥感影像可覆盖时段,发展了基于多水体指数合成水体频率数据,进而提取水域范围的自动化方法。在此基础上,进一步分析了滇池面积与岸线形态的时空演变特征,并从气候变化和人类活动角度分析了滇池水域范围与岸线变化的影响因素。通过重建滇池百年尺度的变化过程,可望深入理解滇池水域范围与岸线变化的时空演变规律,为滇池的水资源管理与生态服务功能评价提供科学依据。

1. 研究区域及数据来源

1.1 研究区域概况

滇池位于昆明市西南,地理位置为北纬 24° 40'~25° 02',东经 102° 37'~103° 00'。该区域属亚热带高原季风气候,年均降水量 1036.10 mm,年均蒸发量 1870.00 mm,平均水域面积 302.53 km²。滇池四周群山环绕,汇水面积达 2866 km² ^[11]。历史时期滇池面积变化剧烈,据史料记载,滇池总面积上古时期约 1000 km²。明代以来滇池面积近 350 km²,清代起逐渐萎缩至 320 km² ^[12]。近年来,滇池受人类活动影响较大,特别是随着昆明市的快速城市化发展,滇池周边的自然土地逐渐被建筑、道路和其他基础设施占用,

滇池岸线被大量人工化,不透水层(如道路、建筑物)面积增加,加之湖水被大量引用于农田灌溉等活动,导致滇池水位下降、水体萎缩等问题日益突出^[13]。这些变化不仅影响了滇池的水文水环境,还对区域生态系统和气候调节功能产生了深远影响。因此,开展长时序精细化的滇池面积及形态演变分析,对于深入理解滇池水文水环境变化规律、揭示人类活动与自然因素对湖泊演变的驱动机制具有重要意义。

1.2 数据来源及预处理

为系统开展百年尺度的滇池面积与形态变化分析,本研究综合收集了多源数据资料,主要涵盖历史地形图、文献资料、已解密的侦察卫星数据、Landsat 系列卫星影像、全球土地覆盖数据(Global Land Cover, GLC)、气候研究单元数据(Climatic Research Unit, CRU)及野外调查资料等多源辅助数据等。具体数据来源及基本信息见表 1。

1.2.1 历史地形图及航空摄影数据 百年尺度的滇池水域范围重建面临的主要挑战在于 1980 年以前缺乏可用的遥感影像数据,难以直接获取湖泊水域范围的精确信息。为解决这一问题,本研究综合收集了多种历史数据,主要包括 1920s 民国时期由中央研究院实测的 1:5 万地形图数据、1951 年昆明县志图、1957 年与 1972 年滇池及周边地区的航空正射影像图等。这些数据为早期滇池水域范围的重建提供了重要依据(图 1)。

1.2.2 锁眼卫星影像数据 由于历史地形图数据的时相覆盖有限,本研究还引入了锁眼卫星(Keyhole, 简称 KH)数据以辅助早期滇池水域范围的重建^[14]。锁眼卫星是美国在冷战时期部署的高分辨率侦察卫星系统,其 KH-1 到 KH-9 系列部分历史影像(1960 年-1972 年)已公开并可通过美国地质调查局(United States Geological Survey)的 Earth Explorer 平台下载。通过资料搜集及筛选,本研究使用完整拍摄到滇池区域的 1964 年、1965 年、1970 年影像(图 1),在预处理后,采用与历史地形图类似方法,用于进行对水体范围的提取并统计周长和面积。

表 1 数据来源及基本信息

Table 1 Data Sources and Basic Information

文件名	时间	格式	来源	比例尺/分辨率	坐标系
五万分之一中国地图	1920	jpg	台湾省中央研究院档案	1:50000	不详
昆明县志图	1951	dwg, jpg	昆明市滇池高原湖泊研究院	无	北京 54
航空正射影像图	1957	jpg	高原湖泊研究院	1:50000	北京 54
	1972	jpg	高原湖泊研究院	1:50000	北京 54
锁眼卫星影像	1964	tif	美国地质调查局	1:50000	无
	1965	tif	美国地质调查局	1:50000	无
	1970	tif	美国地质调查局	1:50000	无
Landsat 卫星影像图	1980、1985、1990-2023	tif	美国陆地资源系统卫星	30m	WGS 1984
GLC 土地利用类型数据	1985-2022	tif	国家地球系统科学数据中心	30m	WGS 1984
Climatic Research Unit 气候数据集	1920-2023	nc	英国东英吉利大学气候研究中心	0.5°	WGS 1984
CHM_Drought 数据集	1961-2023	nc	北京师范大学	0.1°	WGS 1984

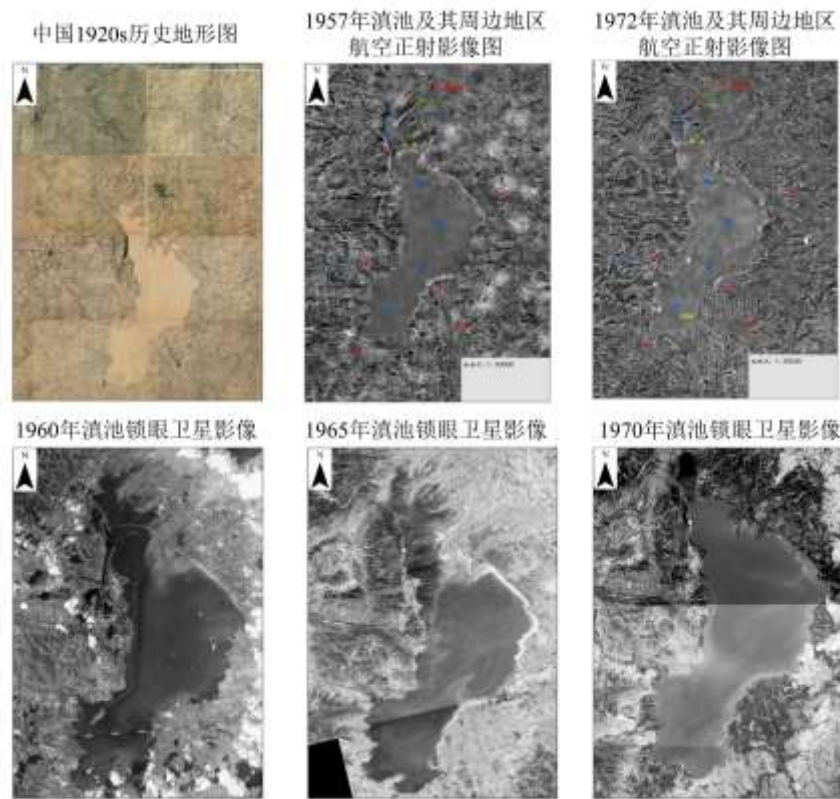


图 1 预处理后的历史地形图及锁眼卫星影像

Fig. 1 Preprocessed historic topologic map and KH satellite imagery

1.2.3 Landsat 卫星影像数据 20 世纪 80 年代以来随着遥感影像数据的不断丰富，为开展长时序的湖泊水域变化监测提供了可能性^{错误:未找到引用源。}。其中，Landsat 系列卫星作为对地观测光学遥感数据的代表，以其全球覆盖、长时序连续性、较高空间分辨率（30 米）以及丰富的光谱信息，成为湖泊水域范围监测的理想数据源。Landsat 数据能够准确识别湖泊水域区域，并对湖泊、湿地及其他小尺度地貌的变化具有较强的监测能力。鉴于此，本文选取 1980 年、1985 年及 1990 年至 2023 年间逐年的 Landsat 卫星影像，采用基于遥感水体指数自动提取湖泊水域范围，并分析湖泊面积的演变特征。

1.2.4 配准精度与分辨率转换 为保证历史影像与 Landsat 数据的一致性，本文在 GIS 软件中选取 10 对以上同名控制点（Ground Control Point, GCP），对纸质地形图、锁眼卫星影像与 Landsat 影像采用二次多项式模型进行配准。配准完成后，通过检查所有 GCP 的残差，要求计算得到的均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）均小于 1 个像素以满足精度要求。此外，还将原始分辨率重采样至 30 m，以匹配 Landsat 的像元尺度，并统一坐标系至 CGCS2000。以确保多源影像在空间尺度和配准精度上的可比性，为后续不同时期岸线提取和面积统计提供了可靠基础。

1.2.5 土地利用数据与气象数据 为进一步分析滇池岸线时空变化的驱动因素，揭示滇池岸线时空变化的驱动因素，本研究采用了 GLC_FCS30 土地利用数据。GLC_FCS30 是全球首个空间分辨率为 30m 的土地覆盖产品，由中国科学院地理科学与资源研究所、国家基础地理信息中心等机构联合开发，具有较高的精度和可靠性^[21]。该数据为分析滇池岸线土地利用变化及其对湖泊演变的驱动机制提供了重要支持。在滇池百年尺度水体范围变化分析的基础上，本文针对 GLC_FCS30，选取 1985 年至 2020 年间每五年一期，2020 年后每年一期（2021、2022 年）滇池及周围区域土地利用类型数据（附图 1），对滇池岸线土

地利用进行长时序分析，探讨滇池岸线变化的影响因素。对于滇池岸线变化驱动机制分析中探究气候因素的影响，本研究使用空间分辨率为1km，时间为1920年1月至2023年12月的CRU（Climatic Research Unit）气候数据集^[22]，以及1961年至2023年的CHM_Drought数据集^[23]，进行长时序的滇池降水、温度、蒸散发、干旱指数等气象因子的反演。

2. 研究方法

本研究技术路线如图2所示。首先，基于历史地形图、航空影像及遥感卫星影像实现滇池历史时期的湖泊水体范围提取，主要包括基于历史影像的人工解译方法和基于遥感影像的自动提取方法；然后在水体范围提取结果基础上，对湖泊岸线形态的时空变化进行分析；最后，基于土地利用和气象等资料，分析岸线变化的驱动因素。

2.1 基于历史影像的湖泊水域人工解译方法

在仅存历史影像时段，本研究采用人工目视解译方法得到各时段岸线，具体步骤包括地形图与影像图的数字化处理及湖泊岸线目视解译与勾绘两方面。首先，将纸质地形图与影像图扫描为高分辨率GeoTiff格式文件，并对部分坐标系未知图件基于稳定的地物要素（山体、不变建筑物等）作为GCP统一地理配准，配准方法详见1.2.4节。完成配准后，基于地形图与影像的灰度差异及地物特征，以人工目视方式精确勾绘滇池岸线，并由此统计各时期的水体范围与周长变化^[24]。

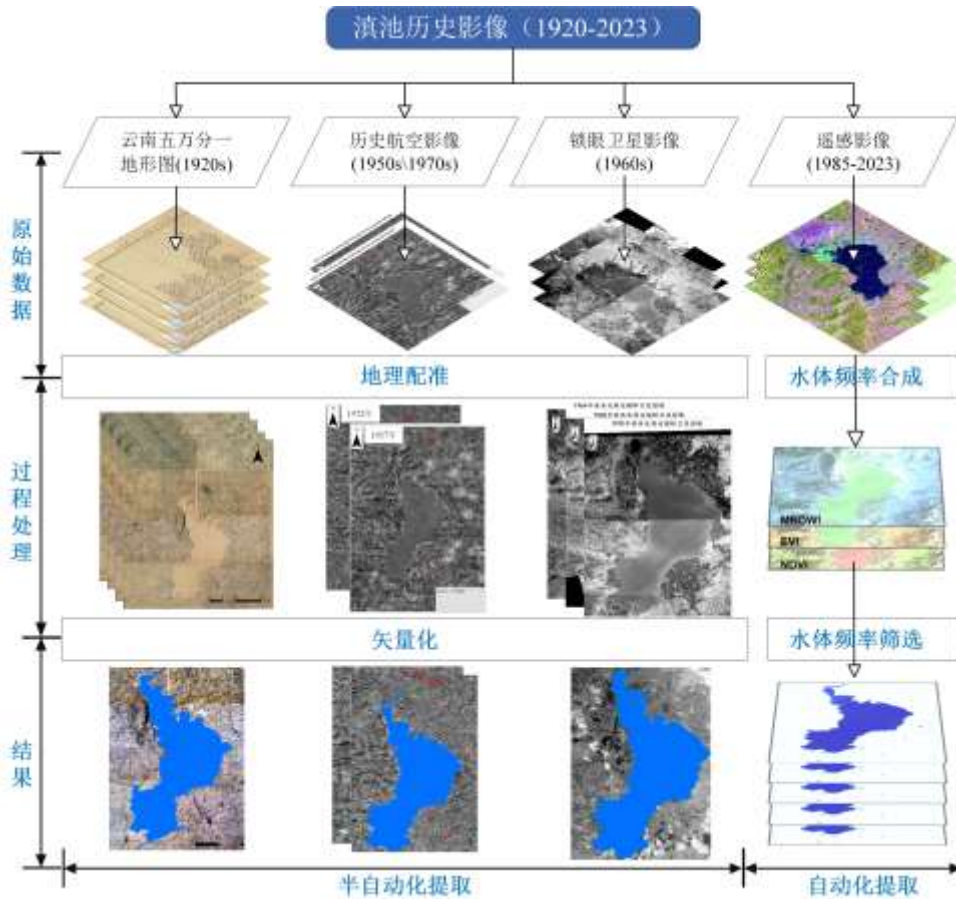


图2 本研究技术路线图

Fig. 2 Workflow of this study

2.2 基于遥感影像的湖泊水域自动化提取方法

对可获取遥感影像的时段，基于 Landsat 遥感影像数据提取上发展了一套联合多种水体指数的水域范围提取方法。主要包含水体指数计算、水体频率合成、水体频率判别、提取结果精度验证。

(1) 水体指数计算。在原始多光谱遥感影像基础上，通过地表反射率影像转换处理，计算 NDVI、EVI、mNDWI 三个水体指数并获得初步水体信息^[18]，具体公式如下：

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6\rho_{red} - 7.5\rho_{blue} + 1} \quad (2)$$

$$mNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{swir}}{\rho_{green} + \rho_{swir}} \quad (3)$$

其中 ρ_{nir} 、 ρ_{red} 、 ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{swir} 分别为图像的近红外、红色、蓝色、绿色、短波红外波段反射率。

(2) 水体频率合成。在水体指数提取结果的基础上，利用所有可用的影像，根据公式(4)、(5)，进行水体频率合成，获得长时序范围内的水体频率合成图^[25]。

$$W = [(mNDWI > EVI) \text{ or } (mNDWI > NDVI)] \text{ and } (EVI < 0) \quad (4)$$

$$FW = \frac{N_{water}}{N_{good}} \quad (5)$$

其中 FW 为水体频率， N_{water} 为水体次数， N_{good} 为有效观测次数。

(3) 水体频率判别。基于水体频率判别图，按 25%、50%、75% 三个阈值分别生成丰、平、枯水期水体掩膜。本文以 25%（丰水期）作为滇池时序分析的统一口径，并据此提取逐年水域范围。

(4) 提取结果精度验证。为确保上述提取方法的精度，以 2024 年 8 月于滇池采集的典型岸线无人机正射影像作为外部几何精度验证样本，样区误差不超过 2.24%，验证了方法的空间几何可靠性（附图 2）。

2.3 基于湖泊岸线形态指标的形态时空演变分析方法

湖泊岸线作为人类活动频繁且人地关系敏感的区域，其形态特征及变化规律对湖泊资源的合理开发与利用具有重要意义。在基于 2.1 节与 2.2 节所获取逐年岸线数据基础上，进一步采用形态指标对湖泊形态进行定量描述，以揭示滇池岸线时空变化的规律。湖泊形态除面积与周长为参考外，还需反映其岸线弯曲度、长宽比与整体形状等，其中岸线发育系数与近圆度最具代表性。基于此，本文选取面积、周长、岸线发育系数与近圆度四项指标，系统评估滇池百年岸线的时空演变。各指标的具体定义如下：

(1) 面积（Area）即湖泊水域的实际表面积。面积变化直接反映了湖泊水域范围的扩张或收缩。

(2) 周长（Perimeter）即湖泊岸线的总长度。周长变化反映了岸线形态的复杂程度及其演变趋势。

(3) 岸线发育系数（Shoreline Development Index, SDI）表示湖泊岸线的曲折程度，当岸线景观越丰富，其湖泊岸线在形态上越多变，岸线的发育系数越大。并提供湖泊生态多样性的指示，较高的岸线发育系数往往伴随多样的生态栖息地。岸线发育系数计算公式如下式。

$$D_L = \frac{D_0}{2 \times \sqrt{\pi} \times \sqrt{A}} \quad (6)$$

其中， A 为湖泊面积， D_0 为湖泊岸线长度。

(4) 近圆度（Circularity）是湖泊形状接近圆形的程度，一般以湖泊实际面积与同周长圆面积的比值来表示。其用来描述湖泊的形态紧凑性，近圆度越高，湖泊形状越接近圆形，水流较均匀。并且为湖泊水动力特征提供指示，较高的近圆度表明湖泊较为集中，水流趋于稳定，便于沉积物沉降。其计算公式如(7)所示：

$$Cr = \frac{4 \times \pi \times A}{P^2} \quad (7)$$

其中, A 为湖泊面积, P 为湖泊岸线周长。

2.4 基于多源数据的岸线变化影响因素分析

为进一步深化岸线时空变化的驱动机制, 本文将从土地利用和气候变化两个方面展开分析。针对土地利用, 构建岸线缓冲区并与 GLC_FCS30 土地利用数据进行空间叠置, 划分岸线为耕地、人工、生态三种用地类型, 判定岸线主导用地, 并分析其年际变化; 针对气候变化, 基于 1.2.5 节数据评估 1920s—2023 年年均气温、年均降水与蒸散发的趋势, 并结合 1960 年以来干旱指数识别极端事件, 检验其与水域范围及岸线形态变化的相关性。

3. 结果与讨论

3.1 滇池面积时空演变特征

本研究最终构建了滇池百年尺度的水域范围数据集, 涵盖了 1920s、1957 年、1964 年、1970 年、1972 年、1980 年、1985 年以及 1990-2023 年逐年的滇池水域范围信息。在近百年尺度上, 滇池水体面积总体上由 337.01 km² 下降至 308.19 km², 萎缩 8.55%, 并分三阶段演变 (图 3); 在 1920s 至 1990 年阶段, 水体面积呈现大幅萎缩期, 由 337.01 km² 下降至 298.33 km², 其中对比 1920s 至 1950s 与 1950s 至 1990s 两个小阶段, 前者水体面积呈轻微下降态势, 后者则出现大幅萎缩, 面积年均下降速率 1.06 km²/年; 1990 年至 2010 年阶段, 面积出现小幅回升, 保持在 299 km² 上下范围波动, 逐步趋于稳定; 2010 年至 2023 年阶段, 前期开始出现间歇性小幅度正负距平波动, 水体面积在 2012 年到达最低点 294.71 km², 相较 1920s 时期萎缩 12.55%, 并自 2012 年起至 2023 年水体面积开始缓慢增长至 308.19 km², 增幅 4.57%。

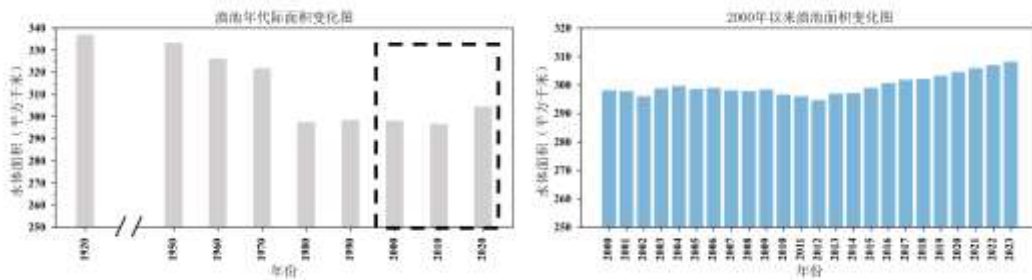


图 3 滇池百年水域面积变化图 (1920s-2023)

Fig. 3 Anomaly map of century-long changes in water area of Lake Dianchi (1920s-2023)

究其原因, 在 1920s 至 1990 年间, 面积大幅萎缩同城市发展及昆明市的扩张具有较强的关联性。其中在 1920s 至 1950s 间, 湖泊面积从 337.01 km² 缓慢降至 332.10 km², 与同期中降水量的减小与潜在蒸散发的增加存在较高吻合, 气候可能为主导因素。在 1950s-1980s 时期, 出现大规模围湖造田以及昆明建成区向湖岸扩张, 使得水体面积逐步萎缩, 此时人类活动则为主导因素; 1990 年-2010 年间, 昆明市政府逐步实施了水资源保护和生态修复措施, 如截污治污工程、生态补水等, 这促使该时期水体面积保持稳定。2010 年至 2023 年间, 尤其自 2012 年起, 相关政策出台, 逐步拆除滇池周围防浪堤, 使得水域空间开始稳步恢复。

与当前同类研究对比, Wu 等人基于 2000–2016 年 Landsat 系列影像, 也观察到滇池自 2011 年后面积变化趋势, 与本研究延伸至 2023 年的结果基本一致^[26]; 肖茜等人则以 TM/ETM+ 和 OLI 影像监测 1985–2000 年间滇池面积年下降速率约 0.8 km²/年, 并在 2000 年初出现短暂回升, 与本研究保持一致^[10]。除此本研究定量填补了 1920–1985 年期间的空白, 还在 2010–2017 年间识别出第二个回升高峰, 进一步丰富了滇池百年尺度的演变图景。

比较不同年代际滇池水域时空演变, 本研究在水域范围数据集基础上对各时相岸线进行叠加 (图 4)。发现岸线形态显著变化, 其中, 以草海区 (a) 以及东部 (b、d)、东南部 (f) 区域退缩较为明显, 反映出该处填埋与岸线改造活动最为集中。相较之下, 西北部和北部岸段相对稳定, 仅在 c 和 e 区域出现小幅变

化。差异主要源于昆明市城区开发重心集中于滇池东岸，东岸受到较大影响。

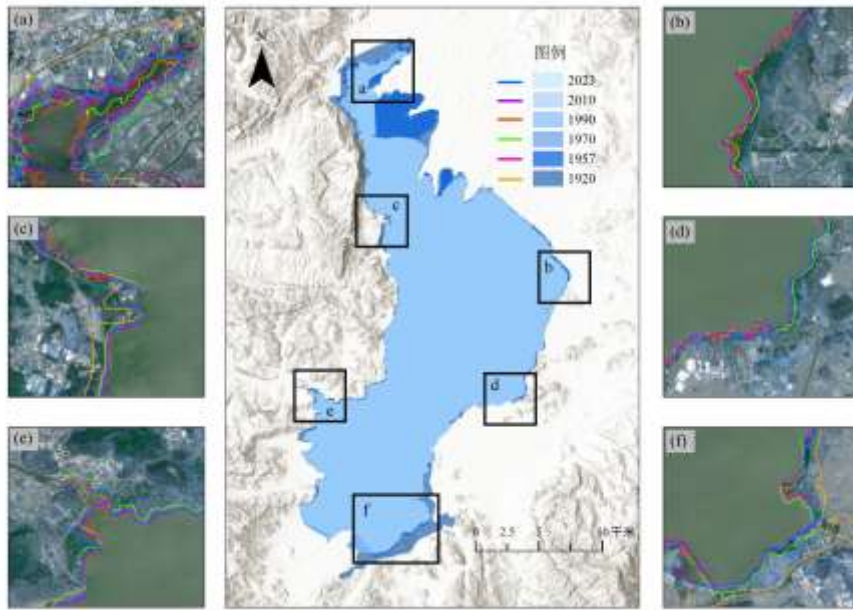


图4 滇池典型年代际水域范围变化

Fig. 4 Typical decadal water area map of Lake Dianchi

3.2 滇池形态时空演变特征

本研究进一步分析了滇池在百年尺度下的水域面积、周长、近圆度与岸线发育系数的时空演变特征（图5）。结果表明，不同时期滇池在湖泊形态上也呈现明显阶段性变化，在1920s至1990年期间，近圆度从0.19下降至0.11，发育系数由2.31攀升至3.05，湖体形态由规整形态逐渐弯曲与复杂化，发生了由“圆润平滑”向“复杂曲折”转变。1990年至2010年期间，近圆度则在0.11—0.15区间波动，前期略有抬升，但仍处于低位，发育系数在2.5—2.9之间反复起伏，表明岸线维持高复杂度并呈现小幅调整。2010年至2023年期间，随着生态修复工程推进，近圆度从0.17回升至0.20。发育系数由2.55逐步回落并在2017年降至最低2.23，随后回升至2.67。总体趋势是湖体由“高折度”向“规整紧凑”转变，同时表明相关政策措施已对岸线复杂度产生积极影响。

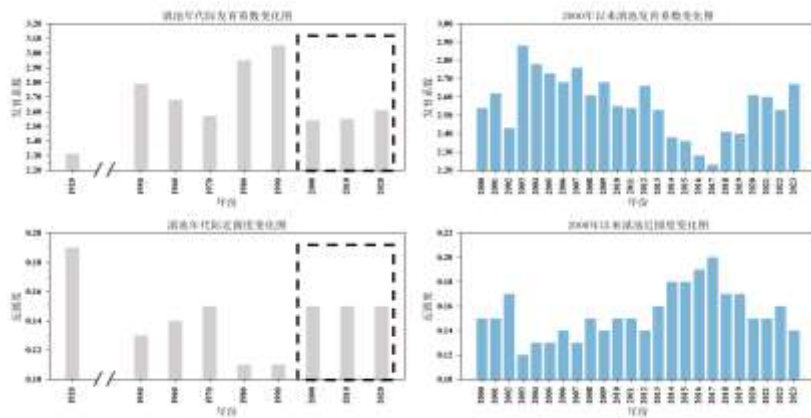


图5 滇池百年水域面积、周长、近圆度和发育系数变化（1920s-2023）

Fig. 5 Centennial changes in water area, perimeter, circularity index, and shoreline development index of Lake Dianchi (1920s-2023)

3.3 岸线变化的影响因素分析

在揭示滇池面积及岸线时空演变特征变化的基础上,本研究进一步在气候变化和人类活动两方面探讨滇池岸线变化的影响因素。

3.3.1 气候变化影响分析 降水、蒸发量、温度等因素对滇池流域的地表水循环会产生直接影响。昆明的年均气温在1970年至2023年期间明显上升,同时随着昆明城市化进程加快,城市热岛效应更加显著。建筑物的增多和城市扩张减少了地表植被覆盖,增加了温度上升的速度。相比较而言,降水的影响对滇池的水域范围影响更为直接。基于CRU及CHM_Drought数据集,对滇池周边1920年至2023年间年平均降水、平均潜在蒸散发(Potential Evapotranspiration, PET)、平均温度和标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)进行了分析(图6)。

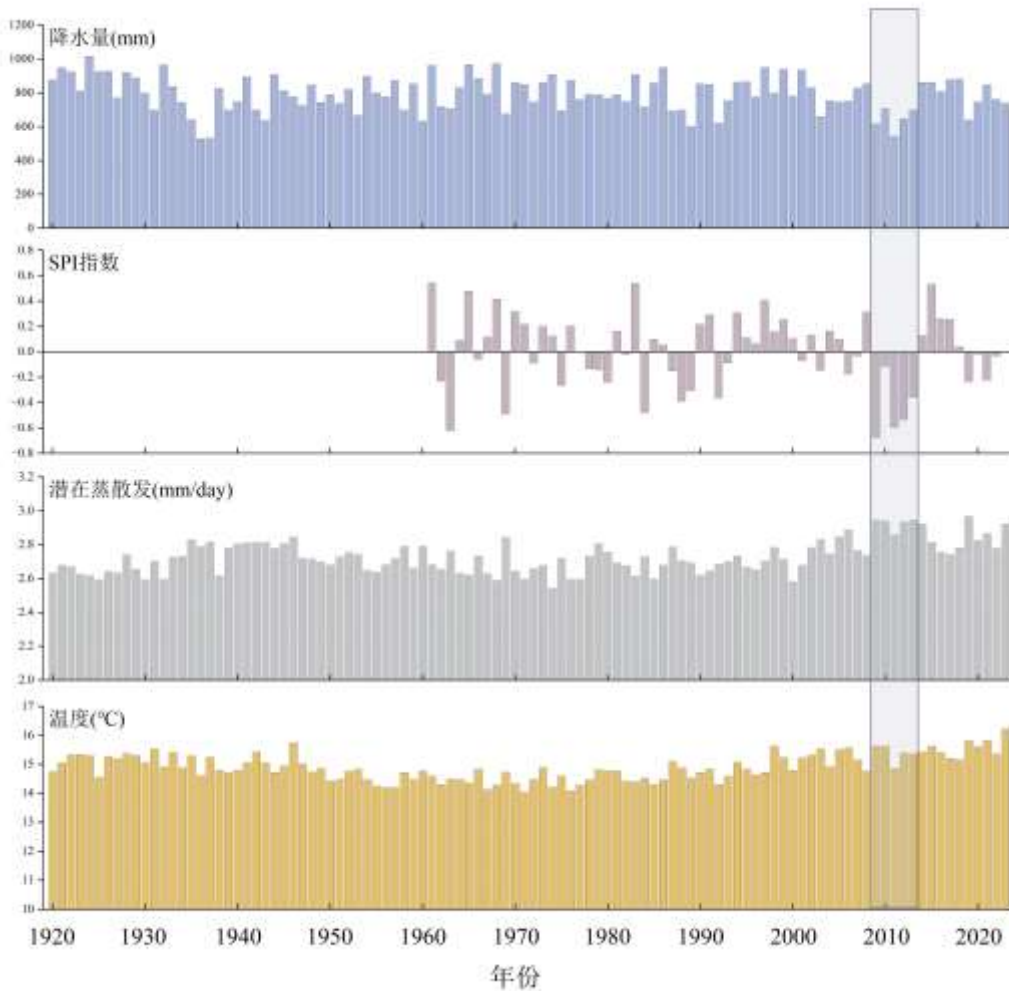


图6 1920年至2023年滇池周边平均降水量、SPI、潜在蒸散发量与年平均温度变化图

Fig. 6 Changes in average annual precipitation, average annual standardized precipitation index (SPI), average potential evapotranspiration, mean annual temperature around Lake Dianchi (1920–2023)

整体上,滇池周边年均降水量呈波动下降,2009年-2014年间,降水量在其时段显著偏少,低于多年均值,对应持续干旱过程。SPI指数通过量化降水偏离历史均值的程度,在期间与年降水量呈现显著正相关。在降水量丰沛的年份(如1998年、2016年),SPI值明显增高(SPI>1.0)。而在降水显著偏少的干旱

期（如 2009—2014 年），SPI 值持续低于-1.5。2012 年降水量骤降至历史低值，同期 SPI 指数跌至-2.3，该年干旱强度达“极端干旱”等级，干旱事件则使水体范围短时间内异常下降。潜在蒸散发为表征地表水分蒸发能力的关键指标，其变化与温度存在显著物理上正相关。温度升高会增加空气的持水能力，从而加速蒸发过程。在百年尺度上年均温度与 PET 整体呈同步上升趋势，1970 年—2023 年尤为明显。此外在 2009—2014 年干旱期间，尽管降水量骤减，但温度仍维持高位，间接导致 PET 值居高不下。高温与缺水的共同作用形成“高温—高蒸发—干旱”的正反馈循环，最终导致了水体面积骤减。

3.3.2 人类活动影响分析 在借助 GLC_FCS30 土地利用数据得到的岸线主导用地分类后，对比年际分类结果发现，人类活动与城市化进程的加速在岸线用地类型变化中存在显著影响。对比 1985 年与 2020 年岸线类型分布（图 7），草海沿岸及海埂大坝区域（a）与东侧岸线（b）的用地类型发生了显著变化，耕地与生态用地大量转向人工，岸线用地类型发生转化。在西侧区域（c）主要表现为生态转向耕地。究其原因，滇池东侧岸线作为城市主要用地，自 20 世纪中期以来，围湖造田、筑防浪堤和城市扩张等人类活动是导致滇池湖滨带耕地与生态用地面积大幅减少关键之一。尤其湖岸带历来是人类活动最集中场所，直接侵占湖滨湿地和耕地这一现象尤为突出^[27]。

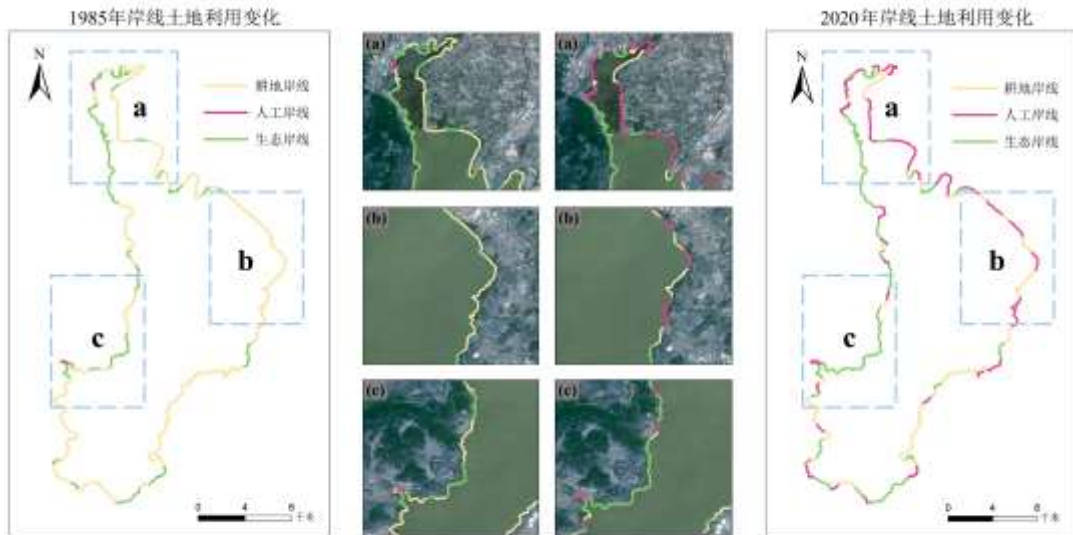


图 7 1985 年与 2020 年滇池岸线结果对比

Fig. 7 Comparison of Lake Dianchi shorelines in 1985 and 2020

在统计年际岸线用地类型的长度比例变化结果后（图 8），耕地岸线表现持续下降趋势，在 1985 年至 2020 年期间，由 108.05 km 减少至 70.82 km，此后波动下降，2015 年达到最低点 56.30 km。2015 年后略有恢复但仍处于低值 59.93 km，这一变化主要受城市化进程和农用地人工化的影响。人工岸线则自 1985 年起呈现快速增长趋势，1985 年至 2000 年间，从 2.72 km 缓慢增加至 9.92 km，进入 21 世纪后快速增长阶段，2020 年达到 43.57 km。生态岸线则呈现先增加后减少的趋势，1985 年至 2000 年间，从 36.31 km 波动增长至 66.27 km，这可能与早期生态保护政策及湿地恢复有关。2000 年之后均匀下降，尽管部分区域实施了生态修复工程，但整体受城市化压力制约，生态岸线仍难以持续扩张。

综上所述，人类活动与气候变化共同驱动滇池水域与岸线演变，20 世纪中叶起岸线类型的转型同岸线复杂度上升奠定了湖岸的长期变迁基础；与此同时，流域年均温、降水、蒸散发的缓慢上升与极端气候事件使得水位与岸线形态在低值处波动；进入 2010 年以后，在生态修复与防浪堤拆除的背景下协同促进了滇池的恢复，也揭示出“人—气”互动下的驱动机理。

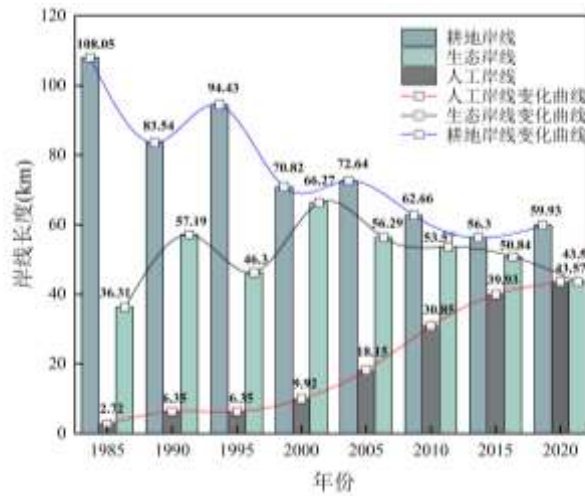


图8 岸线类型分类结果长度统计图

Fig. 8. Length statistics of Lake Dianchi shorelines during 1985 to 2020

4. 结论

重点分析了滇池湖泊水域面积及形态的时空演变特征，构建了滇池百年尺度的水域范围数据集，并初步探讨了人类活动与气候变化对滇池岸线变化的影响，主要结论如下：

(1) 通过整合多源地形图和卫星遥感数据，首次构建了百年尺度滇池水域面积及形态变化数据集。在空间尺度格局上，滇池水域面积及岸线形态百年间发生了显著的变化。得出 1920s—2012 年间，在岸线人工化及形态复杂化的趋势下，滇池水域面积维持波动式下降。2012 年后“四退三还一护”政策实施及防浪堤拆除，推动水域面积开始回升，岸线形态趋于规则化。

(2) 人类活动在水域空间的变化中起决定性作用。1985 年—2020 年人工岸线增长 16 倍，致使湖滨带生态空间被大量侵占。气候变化起次要作用，极端事件（2009-2012）的发生使水域触发短期剧变，造成短时间内水位异常，而致使水文水资源与岸线生态遭受威胁。

(3) 生态治理中，人工堤坝的拆除对于自然岸线的恢复已验证具有高可行性，例如草海区域。气候中需防范极端干旱出现，构建气候韧性体系防范“高温-干旱-高蒸发”正反馈循环对水域生态的威胁。

5 附件

附图 I, 附图 II 见电子版(DOI: 10.18307/2026.0451)

6 参考文献

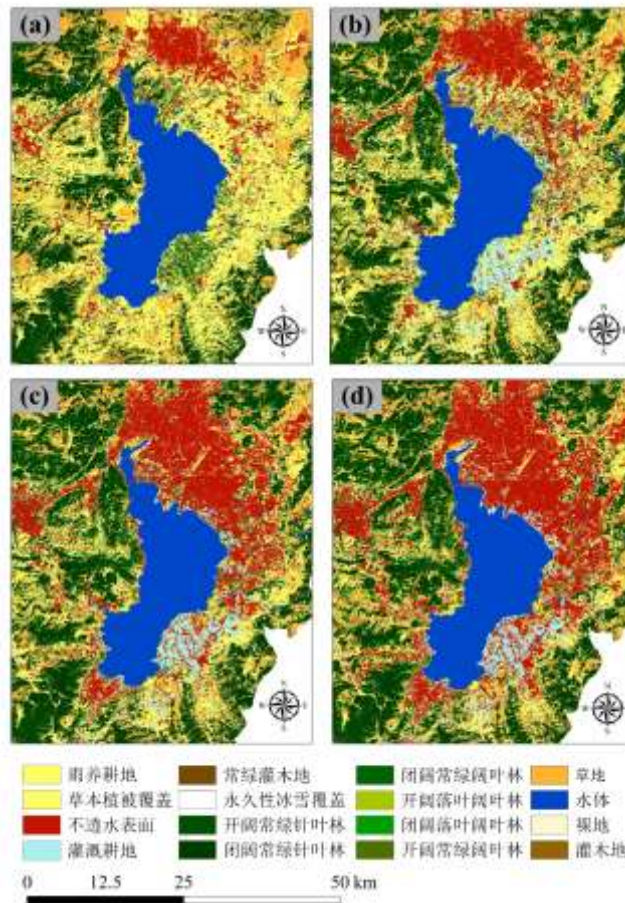
- [1] Ma Teng, Duan Xuejun, Wang Jiaheng, et al. Evolution of Slope Spectrum of Construction Land in Plateau Lake Basins: A Case Study of Dianchi Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(7): 1142-1152. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.20230733.[马腾,段学军,王佳恒,等.高原湖泊流域建设用地坡谱演变研究——以滇池流域为例.地理科学,2024,44(7):1142-1152.DOI:10.13249/j.cnki.sgs.20230733.]
- [2] He, Jia; Xu, Xiaomei; Yang, Yan; et al. "Effectiveness and Existing Problems of Comprehensive Water-Environment Management in Dianchi Lake." *Journal of Lake Sciences*,2015,27(2): 195-199.[何佳,徐晓梅,杨艳,等.滇池水环境综合治理成效与存在问题.湖泊科学,2015,27(2):195-199.]
- [3]白龙飞.当代滇池流域生态环境变迁与昆明城市发展研究（1949-2009）[学位论文].云南大学,2012.
- [4] Yang, Feng; Xu, Qiuji; Song, Yonghui; et al. "Trends in the Evolution of the Aquatic Ecological Environment, Governance Process, and Effectiveness in the Dianchi Lake Basin." *Journal of Environmental Engineering Technology*,2022,12(3): 633-643.[杨枫,许秋瑾,宋永会,等.滇池流域水生态环境演变趋势、治理历程及成效.环境工程技术学报,2022,12(3):633-643.]

- [5] 云南日报. 昆明建设滇池湖滨生态缓冲带助力湿地修复——“四退”筑绿岸“三还”扬清波. 2024-09-18.
- [6]张焯. 滇池及星云湖区域战国秦汉时期农牧业研究[学位论文]. 云南大学, 2022.
- [7] Lu, Lichen; Hong, Liang. *Spatiotemporal Variation of Water Area in Nine Plateau Lakes of Yunnan Province*. *People's Yangtze River*, 52(10) (2021): 128–134. <https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.10.019>[卢丽琛,洪亮. 云南省九大高原湖泊水体面积时空变化研究. 人民长江, 2021, 52 (10): 128-134.]
- [8]余姝辰.基于历史地图和多源遥感数据的近百年来洞庭湖区江湖格局演化[学位论文].中国地质大学.
- [9] Gu, Juan; Qin, Yi; Wang, Xin; et al. *Changes in the Inundation Frequency of Poyang Lake Water Bodies and the Response of Wetland Vegetation*. *Acta Ecologica Sinica*,2018, 38(21): 7718–7726.[谷娟,秦怡,王鑫等.鄱阳湖水体淹没频率变化及其湿地植被的响应.生态学报,2018,38(21):7718-7726.]
- [10] Xiao, Qian; Yang, Kun; Hong, Liang. *Remote Sensing Monitoring and Spatiotemporal Analysis of Surface Water Area Changes in Lakes of the Yunnan–Guizhou Plateau over the Past 30 Years*. *Journal of Lake Sciences*, 2018,30(4): 1083–1096.[肖茜,杨昆,洪亮.近 30 a 云贵高原湖泊表面水体面积变化遥感监测与时空分析.湖泊科学,2018,30(4):1083-1096.]
- [11]昆明日报. 昆明五项措施推进滇池湖滨生态带建设. 2016-07-06.]
- [12]陆韧, 马琦, 唐国莉. 历史时期滇池流域人地关系及生态环境演变研究. 北京: 社会科学文献出版社, 2018.
- [13]周琼. 高原城市湖泊流域的口头环境史——以滇池流域为例. 北京: 科学出版社, 2022.
- [14] Wang, Xin; Zhang, Jingfa; Jiang, Wenliang; et al. *Application of CORONA Reconnaissance Satellite Remote Sensing Data in Active Fault Research: A Case Study of the Jiangsu Section of the Tan–Lu Fault Zone*. *Journal of Remote Sensing*,2018,22(S1): 233–246.[王鑫, 张景发,姜文亮,等.美国锁眼侦察卫星遥感数据在活动断层研究中的应用——以郯庐断裂带江苏段为例.遥感学报,2018,22(S1):233-246.]
- [15]Li, J., Meng, Y., Li, Y.et al. Accurate water extraction using remote sensing imagery based on normalized difference water index and unsupervised deep learning. *Journal of Hydrology*, 2022,612(Part B), 128202.
- [16]Rokni K, Ahmad A, Selamat A,et al. Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery. *Remote Sensing*. 2014; 6(5):4173-4189. <https://doi.org/10.3390/rs6054173>
- [17]Wang, I., Xie, S., Zhang, X.,et al. A robust Multi-Band Water Index (MBWI) for automated extraction of surface water from Landsat 8 OLI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*,2018, 68, 73-91. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.01.018>
- [18] Xu, Hanqiu. *Study on Extracting Water Information Using an Improved Normalized Difference Water Index (MNDWI)*. *Journal of Remote Sensing*, 2005,(5) (2005): 589–595.[徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究.遥感学报,2005,(5):589-595.]
- [19]Zhou Y, Dong J, Xiao X,et al. Open Surface Water Mapping Algorithms: A Comparison of Water-Related Spectral Indices and Sensors. *Water*. 2017; 9(4):256. <https://doi.org/10.3390/w9040256>
- [20] Feng, Siwei; Yang, Qinghua; Jia, Weijie; et al. *A Review of Inland Surface Water Extraction Based on Optical Remote Sensing*. *Remote Sensing for Natural Resources*, 36(3) (2024): 41–56.[冯思维,杨清华,贾伟洁,等.基于光学遥感的内陆地表水体提取综述.自然资源遥感,2024,36(3):41-56.]
- [21]Liu Liangyun, Zhang Xiao, Chen Xidong, Gao Yuan, and Mi Jun GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery<https://doi.org/10.5281/zenodo.3986872>
- [22]Peng, S.Z., Ding, Y.X., et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019,11, 1931–1946. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1931-2019>
- [23]Ding, Y.X., & Peng, S.Z.. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901–2100. *Sustainability*, 2020,12(2), 477.
- [24]Guo J,Wang X, Wang. B et al. Remote-Sensing Extraction of Small Water Bodies on the Loess Plateau. *Water*, 2023, doi: 10.3390/w15050866
- [25] Li, Xinguo; Jiang, Nan; Wang, Hongjuan; et al. *Dynamic Changes of Lake Shoreline Morphology in the Taihu Lake Basin over the Past 30 Years*. *Journal of Lake Sciences*,2005, (4) (2005): 294–298.[李新国,江南,王红娟,等.近 30 年来太湖流域湖泊岸线形态动态

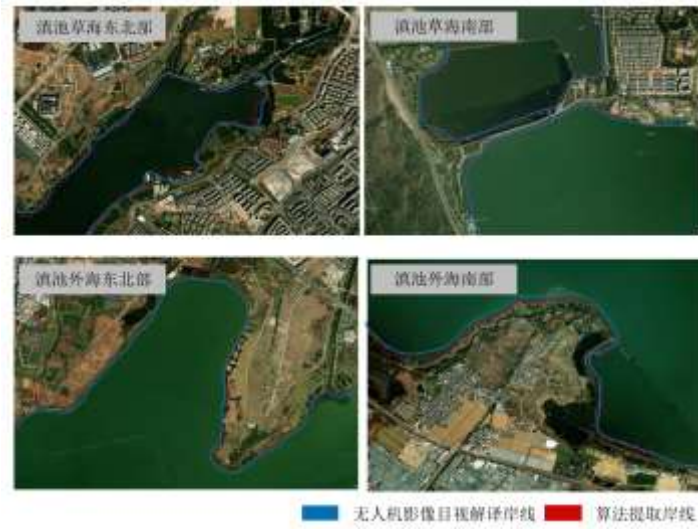
变化.湖泊科学,2005,(4):294-298.]

[26]Wu, P., Shen, H., Cai, N., et al. Spatiotemporal analysis of water area annual variations using a Landsat time series: a case study of nine plateau lakes in Yunnan province, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2016,37(24), 5826–5842

[27] Xie, Dongming; Jin, Guohua. *Landscape Changes in the Lakeshore Zone of Poyang Lake*. *Acta Ecologica Sinica*, 2016,36(17): 5548–5555.[谢冬明,金国花.鄱阳湖湖岸带景观变化.生态学报,2016,36(17):5548-5555.]



附图 1 典型年份滇池周边土地利用类型 (a) 1990 年, (b) 2000 年, (c) 2010 年, (d) 2020 年
Fig. S1 Land use types around Lake Dianchi in typical years: (a) 1990, (b) 2000, (c) 2010, (d) 2020



附图 2 滇池野外实测数据与遥感解译数据对比示意图（蓝色：参考数据；红色：遥感解译结果）
 Fig. S2 Comparison of field measured shoreline and remote sensing interpretation of Lake Dianchi (blue: reference by UAV measurement; red: interpretation results)